

二维亚波长抗反射光栅的制作及其特性分析

赵凤梅, 刘 守, 张向苏, 任雪畅

(厦门大学物理学系, 福建厦门 361005)

摘要: 运用等效介质理论研究了占空比随深度变化的二维亚波长光栅的抗反射原理。对全息干涉法制得的正弦型光栅进行了详细分析, 表明这类光栅形成了渐变折射率的抗反射膜结构。设计并利用两束相干光对称入射到记录介质(光刻胶)分两次曝光的全息方法制备了适用于可见波段的周期为 310nm 的二维正交正弦型光栅。测试结果表明这种光栅在整个可见光波段具有增透作用, 有潜力作为传统抗反射膜的替代品。将具有浮雕结构的记录介质为母版并采用模压或浇铸等方法, 可将结构复制到其它材料上。这类抗反射材料具有制作简单、成本低、可大批量生产等优点。

关键词: 抗反射; 全息术; 等效介质理论; 亚波长光栅

中图分类号: TB 877

文献标识码: A

文章编号: 0253- 2743(2009) 02- 0032- 02

Fabrication and characteristic analysis of two- dimensional anti- reflective subwavelength periodic gratings

ZHAO Feng- mei, LIU Shou, ZHANG Xiang- shu, REN Xue- chang

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: On the base of the effective medium theory(EMT), the anti- reflection property of subwavelength cross gratings with filling factors changing with depth is studied. Sinusoidal shaped gratings fabricated with holographic lithography are analyzed in detail, indicating that this kind of grating can form the structure similar to graded index anti- reflective coatings. Two- dimensional sinusoidal cross gratings with 310 nm period were designed and fabricated using double- exposure method, with two coherent beams symmetrically incident to the recording medium (photoresist). The result shows that the grating has enhanced the transmission at visible wave band, thus has the potential to replace the traditional anti- reflective coatings. Taking the recording medium with relief structures as the master and using embossing or casting methods, the structures can be replicated to other materials. Such anti- reflection materials have the merits of simple fabrication, low cost and mass production.

Key words: antireflection; holography; effective medium theory; subwavelength periodic grating

光学元件由于菲涅耳反射的缘故, 表面的反射总是存在, 必须对其表面进行抗反射处理。近年来为了减少光学元件的表面反射, 一种非常理想的方法是采用渐变折射率膜^[1]。可以采用连续变化的折射率膜层, 从一种介质渐变到另一种介质, 可实现大视场大光谱范围内的高透射。但在实现这种渐变折射率膜层时遇到了相当的困难。一种新的亚波长微结构光栅已经引起了人们的注意。当光入射到占空比随深度变化的亚波长微结构光栅时光波不能分辨轮廓结构, 即光均匀了表面轮廓的光学特性, 就象在渐变折射率膜层传输一样。这种结构最初是从一种飞蛾眼睛的表面结构仿生而来的^[2], 相当于一种各向同性的减反膜微结构表面。

亚波长光栅的一个非常重要的用途就是用来做抗反射表面^[3, 4]。可广泛应用在光学表面元件处理, 太阳能电池, 探测器等。关于它的理论分析^[5]、制作和设计^[6, 7]已有多篇文献报道。仍然存在的问题有周期不能做得太小、只能在红外波段有抗反效果, 制作方法复杂不利于推广应用等。本文详细分析了占空比随深度变化的二维光栅的抗反射原理。利用全息的方法制作了周期为 310nm 占空比随深度变化的二维正交正弦型光栅, 且此制作方法简单易于操作。经测试这种光栅象多层抗反膜一样, 在可见光波段具有很好的增透作用, 与理论相吻合。

1 理论分析

对于亚波长光栅结构适用于标量衍射理论的假设条件不再成立, 必须用电磁场的矢量衍射理论进行分析和研究, 但运算量极其复杂。当光栅周期比入射波长小很多时可以用近似的等效介质理论^[3, 6, 8]来分析。它认为当入射光通过小于光波长的浮雕结构时, 只有零级反射光和零级的透射光存在, 光波的性质类似于通过一等效媒质, 波阵面的形状不发生改变, 等效媒质的光学参量由浮雕的结构特征来确定。

对于一种给定的光栅, 某一衍射级能否在入射空间或在透射空间传播由以下的光栅方程决定:

$$n \sin \theta_m - n_i \sin \theta_i = \frac{m\lambda}{\Lambda}$$

其中 n_i 为入射介质的折射率, n 是衍射级传输的介质折射率(对于反射衍射级 $n = n_i$, 对于透射衍射级 $n = n_s$ 即基底

折射率), θ_i 和 θ_m 分别代表了入射光线和第 m 级衍射光线的倾斜角, λ 为入射光线波长, Λ 代表了光栅周期。

根据等效介质理论, 光通过亚波长光栅时, 光栅的衍射级仅有零级存在。可以得到如下的周期与波长的不等式关系^[6]:

$$\frac{\Lambda}{\lambda} < \frac{1}{n + n_i \sin \theta_{m, \max}} \quad (1)$$

亚波长抗反射结构的另一个特点是由于其等效系数(如折射率)由填充因子确定, 因此可以通过调节光栅的周期、面形、占空比和槽深等参数来实现任意等效折射率, 即使这种折射率的材料在自然界中并不存在, 这是薄膜抗反射所不能比拟的, 因而可以达到零反射率。

对一维亚波长光栅对 TE 波(即光波电矢量垂直于光栅矢量方向)和 TM(即光波电矢量平行于光栅矢量方向)有不同的等效折射率, 取决于光栅的填充系数 F (光栅突出部分的宽度与光栅周期的比值), 这就是所谓的形式双折射现象^[9]。在许多情况下两个偏振态的减反效果是不一样的, 在实际应用中存在许多不便。为了既能够实现良好的减反效果又能够在两个偏振态达到同样的效果, 我们研究了正交的二维光栅。光栅的等效折射率与占空比的关系式^[10]可表达为:

$$n_{\text{eff}} = \left[\frac{(1-f + f n_s^2)[f + (1-f)n_s^2] + n_s^2}{2[f + (1-f)n_s^2]} \right]^{1/2} \quad (2)$$

其中 $f = F^2$, n_s 为基底折射率。

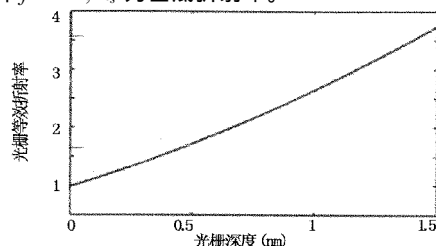


图 1 光栅等效折射率随光栅深度的变化关系

对于占空比随深度变化的正弦光栅, 可以近似看成由许多不同占空比的矩形光栅组成, 光栅介质部分的占空比在深度方向一般都是递增的, 相当于有效折射率在深度方向上也是递增的。根据公式(2)和正弦型光栅填充系数随深度的变化关系得出了光栅等效折射率与光栅深度之间的关系如图 1

收稿日期: 2009- 01- 17

作者简介: 赵凤梅(1982-), 女, 山东省济宁市人, 汉, 厦门大学 2006 级物理系光学专业研究生, 主要研究方向为光全息与光信息处理。

所示。这样每一个薄层的折射率都低于下面一层的折射率, 形成一种渐变的梯度折射率结构, 也就形成了梯度折射率的减反膜结构, 可实现大视场大光谱范围内的高透射。

以用全息干涉法得到的正弦型光栅为例, 正弦光栅可以将其分割成 n 层薄片, 每一层都非常薄以至于可以将该薄片看成很小的矩形。采用这种近似方法就可以将轮廓为曲线的正弦光栅用矩形光栅的方法来解决如图 2(a) 所示, 这样就形成了一种渐变的梯度折射率结构如图 2(b) 所示。

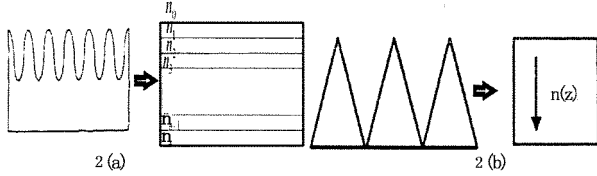


图 2 正弦光栅等效成多片矩形光栅 (a) 及其渐变的梯度折射率结构 (b)

2 二维正交光栅的设计和制作

根据等效介质理论, 光通过亚波长光栅时, 光栅的衍射级仅有零级存在。可见光波长一般在 380nm 至 780nm 之间, 若根据公式 (1), 令 $n_g = 1.5$, 当光垂直入射时, 若在可见光波段满足等效介质理论, 应至少使波长 380nm 处光栅的衍射级仅有零级存在, 这样光栅周期最大应做 253nm。若把正弦光栅等效成多片矩形光栅且把光栅做在光刻胶上, 玻璃基底的折射率一般为 1.5 至 1.7, 根据图 1, 若要从空气的折射率渐变到玻璃的折射率, 光栅深度应至少做到 500nm。根据现有的实验条件选做了周期为 310nm 的光栅。

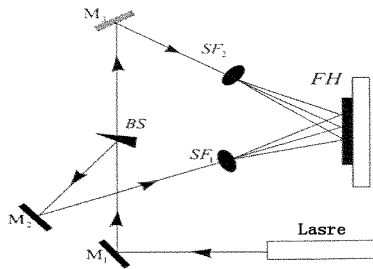


图 3 二维正交光栅制作光路

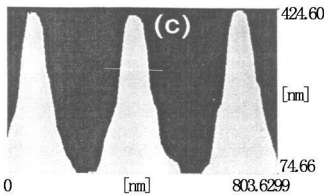
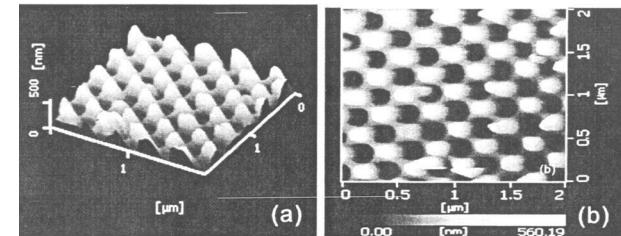


图 4 所制得的光栅的 AFM

本实验我们选用氦镉激光器, 输出波长为 441.6nm, 正性光刻胶。通过多次实验选用如图 3 所示光路, 令一束激光 (功率为 40mW) 经全反射镜 M_1 反射到分光镜 BS 上, BS 将光分为两束, 其中一束经全反射镜 M_2 后再经空间滤波器 SF_1 , 另一束经全反射镜 M_2 再经空间滤波器 SF_2 , 这两束发散光以一定角度对称入射到记录介质 FH 上。一次曝光后将记录介质旋转 90° 再次曝光。然后把曝光的记录介质放在 1.5% 的 NaOH 溶液中显影。为了做到理想的深度, 不断调整曝光和显影时间, 发现两次曝光时间均为 20 秒, 显影 3.5 秒得到的结构最理想。制得光栅的原子力显微镜图如图 4 所示, 图 4(a)

为三维示意图, 图 4(b) 为二维平面图, 图 4(c) 为截面轮廓图, 从图中可以看出光栅形状近似正弦型, 深度约为 350nm

3 测试结果

利用光栅光谱仪测量得到了如下图 5 所示的结果, 在测量过程中, 入射光垂直入射到样品上, 从图中可以看出没有光栅的光刻胶相对于有光栅结构的光刻胶在整个可见光波段都有增透效果, 但在波长 380nm 至 620nm 之间, 增透效果相对不明显, 这是因为在短波长区域, 光栅周期相对入射波长还不够小, 有零级以上的衍射光存在, 使透射光受到损失。若周期能做到更小, 增透效果会更好, 在波长 620nm 至 780nm 之间, 虽然增透效果有所提高, 最高幅度也只有 18%, 这是因为所做得的光栅深度也还不够, 理论上至少要做到 500nm, 而所得的光栅的深度只有 350nm, 如果能增加光栅深度, 增透效果也会有所提高。

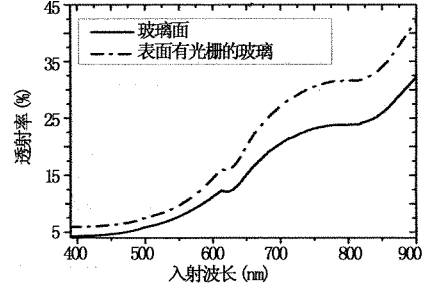


图 5 光刻胶和表面有光栅结构的光刻胶的透射率曲线

4 结论

运用等效介质理论对占空比随深度变化的二维亚波长光栅的抗反射原理进行了详细分析, 用全息干涉的方法做出了周期为 310nm 的近似正弦形状的光栅。经测试这种光栅与多层抗反膜一样, 在可见光波段具有较明显的增透作用, 与所做的有关正弦形光栅可以近似等效于渐变折射率膜层的理论分析相吻合, 因此有潜力作为传统抗反膜的替代品。若将具有浮雕结构的记录介质为母版并采用模压或浇铸等方法, 可将结构复制到其它材料上。这类抗反射材料将以制作简单、成本低、可大批量生产等优点得到广泛应用。但由于实验条件的限制, 所做的光栅参数还未达到理论分析得出的最佳值如周期还不够小, 深度还不够, 形状还没达到标准的正弦形状, 致使增透效果还不是理想, 今后可以尝试做周期更小深度更深标准正弦型光栅以期达到完美的实验结果。

参考文献

- [1] Sankur H, Southwell W H. Broadband Gradient-index Antireflection Coating for ZnSe[J]. Appl. Opt., 1984, 23(16): 2770-2773.
- [2] Clapham P B, Hutley M C. Reduction of Lens Reflexion by the Moth Eye Principle[J]. Nature, 1973, 244: 281-282.
- [3] Grann E B, Moharam M G, Pommet D A. Optical design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength gratings structures[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1995, 12(2): 333-339.
- [4] Raguin D H, Morris G M. Subwavelength Structured Surfaces and their applications[C]. Proc. SPIE, 1993, 173(36): 87-96.
- [5] R. Petit. Electromagnetic theory of gratings[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1980, 258-275.
- [6] Raguin D H, Morris G M. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region[J]. Appl. Opt., 1993, 32(7): 1154-1167.
- [7] Schmid J H, Cheben P, Janz S, et al. Gradient-index antireflective subwavelength structures for planar waveguide facets[J]. Optics Letters, 2007, 32(13): 1794-1796.
- [8] Lalanne P. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures[J]. J. Modern Opt., 1996, 43(10): 2063-2085.
- [9] Grann E B, Moharam M G, Pommet D A. Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two-dimensional subwavelength binary gratings[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11(10): 2695-2703.
- [10] Motamedi M E, Southwell W H, and Gunning W G. Antireflection surfaces in silicon using binary optics technology[J]. Appl. Opt., 1990, 31(22): 4371-4376.